

применяться как для сферических частиц, так и для частиц с осевой симметрией. Кроме того, он может применяться и для проводящих микрочастиц. Хорошо известные и активно обсуждаемые в литературе методы создания оптических пинцетов на основе монохроматических Бесселевых пучков позволяют создавать лишь двумерные ловушки. Они не позволяют создавать трехмерные ловушки и управлять скоростями и ускорениями микрочастиц. Использование импульсного режима работы лазера, а также пульсирующих оптических пинцетов на основе квазимонохроматических полей, позволяет решить указанные задачи, а также облегчает решение проблем, связанных с перегревом микрочастиц в результате мощного непрерывного облучения. Рисунок иллюстрирует воздействие импульса, обладающего структурой Бесселева пучка 1-ого порядка, на скорость стеклянной частицы диаметром 1 мкм.

Литература:

1. Borzdov G. N. Phys. Rev. E, Vol. 61, p. 4462, 2000.
2. Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A. Scattering, absorption and emission of light by small particles.

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ЛАЗЕРНОИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Д. С. Тарасов

Перспективы развитие фототерапии и диагностики злокачественных новообразований связываются с созданием фотосенсибилизаторов нового поколения, имеющих полосу поглощения и испускания в ИК-области и способных эффективно накапливаться в опухолях. При этом оперативное определение локализации опухолей и фармакокинетики проникновения сенсibilизаторов в ткани невозможно без соответствующего спектрометрического оборудования.

Наиболее эффективным методом пространственно-спектрального анализа флуоресценции красителей является получение гиперспектральных изображений исследуемых объектов. В статье рассматривается практическая возможность использования гиперспектрального мониторинга лазерноиндуцированной флуоресценции индотрикарбоцианиновых красителей для медицинской диагностики опухолей.

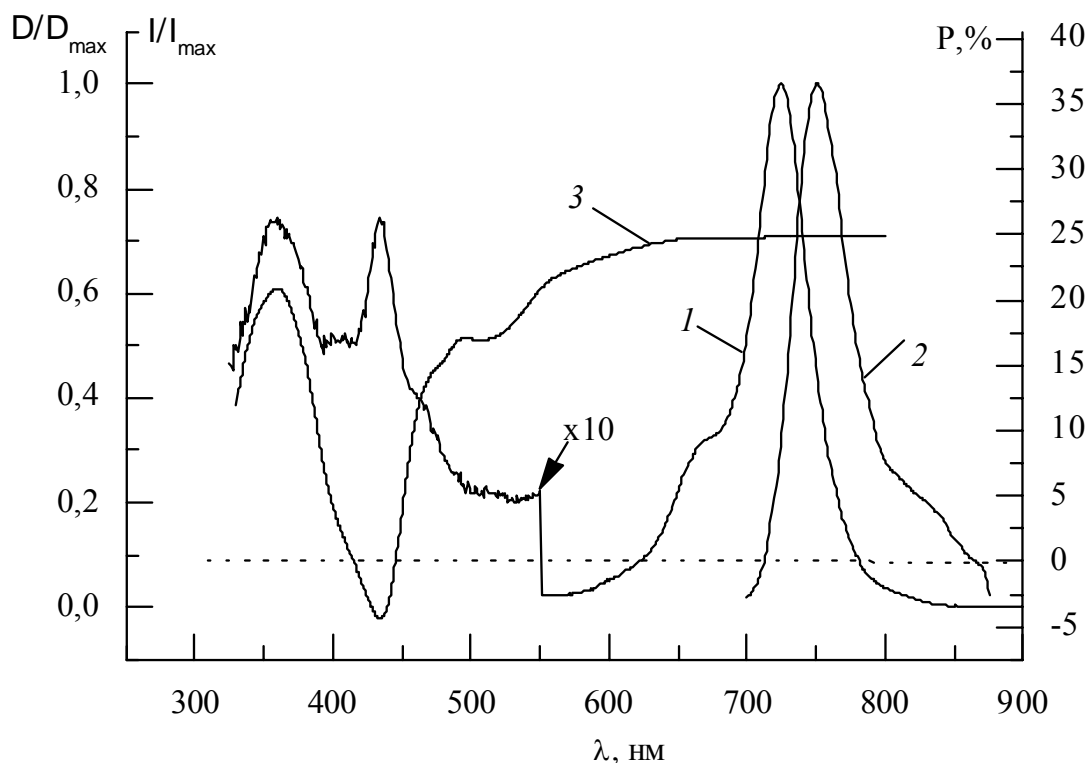


Рис.1. Спектры поглощения (1) и испускания (2) и поляризационный спектр

Индотрикарбоцианиновый краситель относится к классу полиметиновых красителей и содержит цепь из трех виниленовых групп ($-\text{CH}=\text{CH}-$). На концах полиметиновая цепь соединяется с индolenиновыми концевыми группами. На рис.1 представлены спектры поглощения (1) и флуоресценции (2) и поляризационный спектр (3) в этаноле при концентрации 10^{-5} моль/л.

Спектр поглощения в коротковолновой части спектра умножен на 10. Это позволяет обнаружить и в этой части спектра полосы поглощения. Полоса поглощения в длинноволновом диапазоне, максимум которой приходится на длину волны 724 нм, соответствует электронному переходу $S_0 \rightarrow S_1$. Ширина этой полосы поглощения составляет 50 нм, причем в коротковолновой части полоса имеет плечо, обусловленное колебательными уровнями в пределах электронных уровней S_0, S_1 . Наиболее коротковолновые полосы поглощения обусловлены переходами в системе термов концевых групп. В спектральной области, расположенной ближе к длинноволновой области, находится ряд полос поглощения, соответствующих переходам между основным и высокими возбужденными состояниями полиметиновой цепи. Спектр флуоресценции индотрикарбоцианинового красителя смещен относительно полосы поглощения в длинноволновую область. Максимум спектра флуоресценции находится в 750 нм. Заметим, что с некоторой точностью выполняется правило зер-

кальной симметрии Левшина. Спектр флуоресценции практически полностью зеркально симметричен полосе поглощения, соответствующей электронному переходу $S_1 \rightarrow S_0$. Следует отметить, что отличительной чертой всех полиметиновых красителей является высокий коэффициент молярной экстинкции, а для индотрикарбоцианинового красителя в этаноле он составляет $3.0 \times 10^5 M^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Как можно видеть на *рис.1*, при возбуждении в длинноволновой области спектра поглощения флуоресценция индотрикарбоцианинового красителя обладает высокой степенью поляризации. Это обусловлено малым временем жизни флуоресценции, которое для индотрикарбоцианинового красителя в этаноле составляет 1,4 нс. За это время молекула, которая перешла в первое синглетное состояние, не успевает повернуться на значительный угол и, следовательно, испускает свет, поляризованный в той же плоскости. При возбуждении флуоресценции в коротковолновой области поляризационный спектр имеет минимум, значение в котором меньше нуля. В этом спектральном диапазоне индотрикарбоцианиновый краситель имеет полосы поглощения, соответствующие переходам из основного электронного состояния в более высокое состояние (S_2 , S_3 ...). Но вероятность излучательного перехода с высоких состояний мала, в результате чего молекула безизлучательно рекомбинирует в первое возбужденное синглетное состояние, а затем испустит квант света. При этом надо учитывать, что ориентация осцилляторов, соответствующих переходам в более высокие состояния, может не совпадать с направлением осциллятора перехода $S_0 \rightarrow S_1$.

Для оперативного мониторинга лазерноиндуцированной флуоресценции индотрикарбоцианинового красителя на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ разрабатывается дисперсионный гиперспектрометр с пространственным управлением световыми потоками при помощи микрозеркальной матрицы. Данный гиперспектрометр имеет малые линейные размеры благодаря использованию зеркальной оптики и регистрации на ПЗС-детекторах (в спектральном и наблюдательном каналах). Спектральный прибор рассчитан на анализ фотосенсибилизаторов, флуоресцирующих в спектральном диапазоне 700 – 850 нм, и имеет спектральное разрешение не хуже 0.8 нм.

Чтобы показать принципиальную возможность и преимущество проведения гиперспектрального мониторинга локализации индотрикарбоцианинового красителя была собрана упрощенная схема регистрации. На *рис.2* изображен прототип аппаратуры, с помощью которой удалось зарегистрировать изображение флуоресцирующего объекта (*I*), содержащего индотрикарбоцианиновые красители. При этом концентрация красителя была такой же, как и в опухолях спустя 2 часа после внутривенного вве-

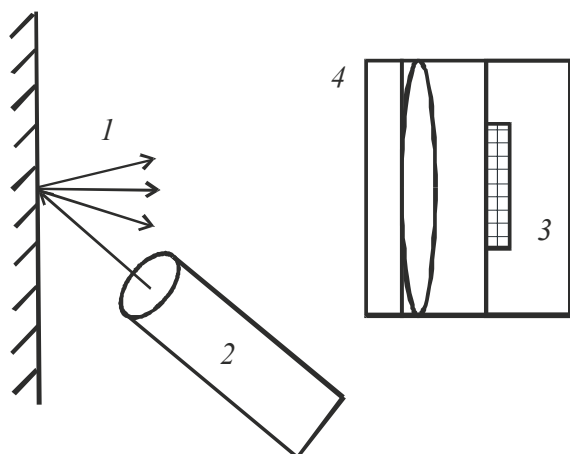


Рис.2. Схема экспериментальной установки

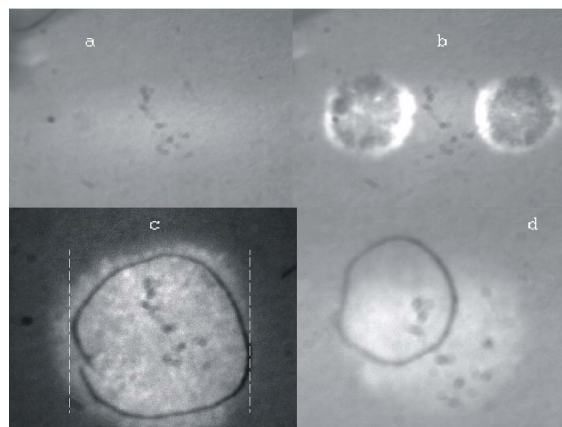


Рис.3. Результаты регистрации гиперспектральных изображений объектов с красителем (b,c,d) и без красителя (a)

дения. В качестве источника света для возбуждения флуоресценции красителя использовался полупроводниковый лазер с $\lambda = 660$ нм (2). Изображение объекта регистрировалось с помощью цифровой камеры (3), время экспозиции составляло 200 мс. Перед объективом камеры был установлен абсорбционный светофильтр (4), прозрачный в области флуоресценции индотрикарбоцианинового красителя и задерживающий лазерное излучение. В качестве цифровой камеры использовался один из ПЗС-детекторов гиперспектрометра. Для управления цифровой камерой и обработки данных использовалась специально разработанная программа.

На рис.3 представлены результаты регистрации объекта с красителем. Изображений объекта, освещаемого лазером, без красителя на рис.3(а) демонстрирует, что светофильтр практически полностью поглощает излучение лазера, и только незначительная часть излучения рассеянного поверхностью объекта проходит фильтр и регистрируется камерой. Рис.3(с,d) показывает преимущество гиперспектральных методов для мониторинга индотрикарбоцианинового красителя. По данному снимку легко можно определить локализацию красителя, тогда как при концентрации 10^{-5} моль/л в спиртовом растворе уже не было возможности визуально обнаружить краситель.

При концентрации 10^{-3} моль/л, как можно видеть на рис.3(б), флуоресценция регистрируется только на краях области с нанесенным раствором. В центральной части поверхностная плотность красителя велика, в результате чего происходит тушение флуоресценции.

Таким образом, в данной работе на основании спектральных характеристик индотрикарбоцианинового красителя, перспективного фотосенсибилизатора, дано обоснование применению спектральных методов для

мониторинга локализации красителя в опухолях. Разработано программное обеспечение для управления гиперспектрометром с пространственным модулятором света на основе микрозеркального устройства и обработки гиперспектральных изображений. Показана принципиальная возможность проведения гиперспектрального мониторинга объекта с индотрикарбоцианиновым красителем, флуоресцирующим под воздействием полупроводникового лазера.

Литература

1. *Левшин Л. В., Салецкий А. М.* Люминесценция и ее измерения. М., МГУ, 1989. — 279 с.
2. *Паркер С.* Фотолюминесценция растворов. — М.: Мир, 1972. — 512 с.
3. Спектрально-люминесцентные характеристики симметричного трикарбоцианинового красителя ТИКС в растворах / Е.С. Воропай, М.П. Самцов, К.Н. Каплевский и др. // Вестн. БГУ. Сер.1. Физ. Мат. Инф.— 2000.— №2.— С. 28–30.
4. *Воропай Е. С., Самцов М. П., Каплевский К. Н.* Особенности испускания и поглощения индотрикарбоцианиновых красителей при переходах в высокие возбуждённые электронные состояния // Журн. прикл. спектр.— 2003.— Т. 70, №5.— С. 635–641.
5. RITMOS: a micromirror-based multi-object spectrometer // SPIE.—2004.— Vol. 1616, №1.— P. 200–219.

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЖЕЛЕЗЕ МОДИФИЦИРОВАННЫМ КОМПРЕССИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ

М. С. Чибирай, В. В. Углов

Одним из перспективных направлений в науке является модификация поверхностных слоев металлов и сплавов. Как известно, долговечность и износостойкость деталей в большей степени зависит от поверхностных свойств образца. Поэтому их улучшение и является актуальной задачей современной науки [1].

Воздействие компрессионными плазменными потоками на поверхность образцов, приводящее к их существенной модификации, сопровождается протеканием совокупности сложных плазмодинамических и теплофизических процессов. Вследствие взаимодействия мощного потока с поверхностью материала происходит изменение механических свойств образца, структурного, элементного, фазового составов вещества, что ведет к проявлению неравновесности системы [2]. Поэтому целью данной работы был анализ релаксационных процессов и их влияние на микротвердость материала.

Индентирование является простым, оперативным и, в сущности, не разрушающим способом испытания материалов. Метод позволяет про-